

論 文

徳島県木頭地方における長伐期施業スギの成長と材質

三好 悠*・野瀬 正**

Tree growth and wood properties of over 100 years old Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don.)
planted in Kitou forestry region in Tokushima Prefecture

Yu MIYOSHI* and Tadashi NOBUCHI**

徳島県木頭林業地域で100年以上の長伐期施業がなされた6本のスギ試料の成長と材質の関係を明らかにした。樹幹解析の結果、樹高成長率が樹齢70年以降において1%以下となり、長伐期施業の一つの特色であると考えられた。軟X線デンシトメトリーによって測定された年輪幅、平均密度、晩材率は水平系列において成熟材部で漸減する傾向を示したが、晩材率は横ばいの変動傾向を示した。光学顕微鏡によって観察された仮道管細胞の平均放射径と接線径はともに加齢と共に漸増傾向にあったが、材積成長量の減少がみられた個体では平均放射径は横ばいの変動傾向を示した。平均密度が水平系列で減少する要因については、接線径が水平系列において共通した傾向を示したことから、木部母細胞の接線径自体が長伐期施業の間に増大することが一つの要因であることが示唆された。

キーワード：木頭林業、スギ、長伐期施業、材質、年輪構造

Relationship between tree growth and wood properties of over 100 years old six Sugi (*Cryptomeria japonica*) trees planted in Kitou forestry region, Tokushima Prefecture, was investigated. In stem analysis, growth rates occurred in the following order. That is, height growth, diameter growth and volume growth. Mean wood densities decreased remarkably in the region from pith to about 20 years of cambial age, and showed gradual decrease until 100 years of cambial age. Late wood percentages decreased remarkably from pith to about 15 years in cambial age. Beyond this region, they showed rather constant values fluctuated between 20 to 40 % until 100 years in cambial age. Tangential diameters of early wood tracheas gradually increased as the tree age progressed. This was considered to be one of the factors affecting the decrease of mean wood density following the aging.

Key words: Kitou forestry, Sugi (*Cryptomeria japonica*), long-term forest management, wood properties, annual ring structure

1. はじめに

近年の日本林業では優良大径材を生産するという積極的理由、材価の低迷による伐り控えという消極的理由の双方が原因となって伐期が長期化する傾向にある。平成13年度の森林・林業白書には「長期育成循環施業」として従来の伐期の2倍程度である80~120年を主伐期として施業を行うことが目指されている。しかしながら、長伐期施業における伐期の設定基準については明確な根拠がなく、さらなる基礎的知見の蓄積が望まれる。特に拡大造林期に植栽されたスギは日本の主要造林木であり、スギ長伐期施業を行う場合には、優良大径材生産を目指すなど今後の施業目的を明らかにしていく必要があると考えられる。

長伐期施業については「長伐期林の実際」(桜井, 2002)や「大径材生産の林業」(鈴木, 1995)などの書籍に多様な視点からのデータがまとめられている。樹齢100年以上の造林スギにおける樹高成長や胸高直径成長、材積成長などについては以上に挙げた書籍の他、奈良県川上村における吉野スギ(高橋・竹内, 2001, 竹内ら, 2002)、福岡県小石原村の行者スギ(井上・関屋, 1957)および山塚のスギ(関屋, 1958)、東大千葉演習林のスギ(鈴木ら, 1995, 2003)などにおいて報告されている。また、100年生以上のスギ樹幹内における材質変動特性については岐阜県のムマイスギとイボラスギ(深沢, 1967)、三重県の神宮スギ(堀場, 1973)などの報告がある。しかしながら、スギ造林木の成長と材質の関係についての研究例は従来の伐期であった樹齢40年生前後ま

* 徳島県

** 京都大学大学院農学研究科森林科学専攻

* Tokushima Prefecture

** Division of Forest and Biomaterials Science, Graduate School of Agriculture, Kyoto University

での報告が多く、100年程度の期間と考えられるスギ長伐期施業の伐期においてスギの成長と材質の関係がどのようになるのかは明らかでない点が多い。

そこで、本研究ではスギ長伐期施業における成長と材質の関係を明らかにするため、徳島県の木頭林業地域において100年以上の長伐期施業を経た合計6本のスギ試料木について調査・実験を行った。材積成長の元となる年輪幅の変動は樹幹内でどのようにになっているのか、材積成長の変動に伴う密度の変動はどのようにになっているのか、密度の変動要因となる細胞寸法の変動はどのようにになっているのか、細胞寸法を形成する形成層帯活動はどのようにになっているのか、長伐期施業のスギ樹幹内における以上のような成長と材質に関する一連の流れを明らかにすることは、長伐期施業による優良大径材生産を目的とする根拠を補強する有用な科学的基礎情報となると考えられる。

2. 試料と方法

2.1 試料

調査は木頭林業地域として知られる徳島県的那賀川上流域に位置する木沢村と木頭村の2林分において行われた。試料木と採取された円盤試料(厚さ約5cm)の概要を表1に示す。木頭林業地域は1日あたり降水量の日本記録を持つ地点と隣接しており、豊富な雨量と温暖な気候から肥沃な土壌を有し、スギの立地条件として恵まれている。木頭林業の施業面における特色としては、ヘクタール当たり1000~1500本程度の疎植を行い間伐などの労働力を抑さえて自然の力を最大限に利用する省労働力の施業が挙げられる。聞き取り調査では、間伐などの施業について詳しい施業履歴は残っておらず、木沢で20~30年ほどの間隔で弱度の間伐を行い、木頭では最近50年間は間伐を行っていないとのことであった。また、伐

採高における試料木の年輪数は木沢で100, 101, 100, 木頭で130, 128, 129となり、全て樹齢100年以上であった。長伐期施業の現場において100年生を超える材は構造材向け優良大径材として伐採高から4mあるいは6m余りの元玉材を玉切り、それ以上の地上高では4mごとに利用材が玉切られるなど、従来の樹幹解析のように2mごとに円盤を採取することは困難であるといわれる。本研究でも採取された円盤試料の多くは地上高方向に4m強ごとの部位から採取された。過去の研究事例(井上・関屋, 1957関屋, 1958)においては解析される木が巨大である場合などに地上高方向に4mごとの年輪幅測定によって樹幹解析の結果が報告されている。

2.2 軟X線デンシトメトリー

樹幹内全体の材質変動傾向を明らかにするため、採取された円盤試料について軟X線デンシトメトリー(太田, 1970)を行い材質を示す重要な材質指標値として気乾状態の容積密度数(以下、密度と省略)を計測した。この手法は木材の密度と木材を透過する軟X線の量が良好な相関関係にあることを応用した手法である。

最初に、髓から樹皮方向に調製された木材試料の軟X線写真標準吸収体と共に撮影した後、ネガフィルムを現像した。まず、各円盤それぞれの髓から樹皮まで接線方向に幅1cm軸方向に厚さ2mmの軟X線写真撮影用木口切片を作製した。この木口切片を恒温恒湿室内(温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $65 \pm 5\%$)で一晩おいて調湿した。さらに、この木口切片試料を予め密度が既知の標準吸収体とともに撮影フィルム(FUJIFILM industrial X-RAY FILM IX ENVELOPAK FR)上に置き、軟X線写真撮影装置(EMBW特型、ソフテックス社)により撮影した(撮影条件は管電流14mA、管電圧20kV、照射距離2m、照射時間4分)。フィルムは常法によって現像を行いネガフィルムを作成した。

表1 試料木の概要
Table 1 Descriptions of sample trees.

	Height (m)	DBH (cm)	Tree age (year)	Disc No.										Volume (m ³)				
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10					
Kisawa	A	34.9	79.6	103	0.3	4.4	8.5	12.6										3.86
	B	33.6	63.7	103	0.3	4.4	8.5	10.8										2.47
	C	30.7	69.7	103	0.3	4.4	8.5	12.6										2.80
Kitou	A	32.2	63.0	132	0.3	6.4	10.5	14.6	18.7	22.8	26.9	29.0						2.06
	B	40.7	79.0	132	0.3	6.4	10.5	14.6	18.7	22.8	26.9	31.0	35.1	39.2				3.15
	C	34.3	46.0	132	0.3	4.4	8.5	12.6	16.7	20.8	24.9	29.0	31.1	33.2				2.25

Note1:DBH:the diameter at breast height(1.3m).

Note2:Volume:at 100 years old.

次に、濃度測定装置によって木材の密度をパーソナルコンピューター内に取り込んだ。試料のネガフィルムをデンシトメーター (Microdensitometer 3cs型, Joyce Loebel社) を用いて髓から外側に走査し、標準吸収体の密度からネガフィルムの濃度と密度の関係を回帰した。その回帰直線を元にフィルムの光学電流値に変換した後、濃度値をA/Dコンバーターを介してパーソナルコンピューターに取り込んだ (サンプリング間隔: 20回/秒, 速度: 300 $\mu\text{m}/\text{秒}$, スリット幅: 100 μm , スリット高: 1000 μm , 倍率1倍)。

最後に、年輪幅、晩材率、密度 (平均、早材平均、晩材平均) などの材質指標値を年輪ごとに算出した。まず、得られた密度を年輪解析プログラムによって早材・晩材境界の閾値決定した。早材・晩材境界の閾値はスギについて適切な値が得られる550kg/m³とし、早材・晩材の1組を1年輪とした。測定した材質指標値のうち年輪幅を実際の試料と比較し、年輪の数え落としや測定値のズレがないようにした。測定において最初の年と最後の年については正確に一年間分の情報が得られていないと考えられるため、それらの情報は用いなかった。

本研究では採取された全ての円盤試料について軟X線デンシトメトリーを行い、髓から4つの放射方向について年輪幅、晩材率、平均容積密度数などの材質指標値が一年輪ごとに測定された。解析には4方向の平均値を用いた。なお、放射方向には枝や根張りなどの影響がない部位を用いた。

2. 3 樹幹解析

各試料木における樹高、直径、材積の成長量と成長率を明らかにするため樹幹解析 (山田・村松, 1971) を行った。樹幹解析に供した年輪幅は軟X線デンシトメトリーによって得られたデータを用いた。樹高は推定樹高として平均樹高成長率を元に算出した。材積はスマリアン式によって平均的な断面積と材長との積を円柱体として近似した値と頂端部を円錐体とした値を求めた。

成長率 $p(\%)$ はプレスラー式 $p = ((M-m)/(M+m)) \times 200/n$ によって求めた (山田・村松, 1971)。すなわち、ある齢級の総成長量 (m) を1齢級上の総成長量 (M) から差し引いた値を齢級の年数 (n) で除し、さらに平均総成長量 $((M+m)/2)$ で除した値を100倍して成長率を計算した。本研究では齢級 n を5年として樹高、直径、材積の成長率を求めた。

2. 4 光学顕微鏡による観察

形成層帯における1年間に行われる木部形成活動のうち分裂と拡大が長伐期施業の期間にどのような変動傾向

を示すのかを明らかにするため、光学顕微鏡による仮道管細胞の観察を行った。すなわち、2000年に形成された年輪から数えて髓に向かって10年ごとの年輪について光学顕微鏡とマイクロマイクロメーターによる観察を行った。本研究では長伐期施業によって生産される優良大径材の元玉について元口 (Disc 1) と末口 (Disc 2) に着目した。

1年間に形成層帯が木部の放射方向に行った細胞分裂回数を調べるために放射方向1列あたりの細胞数を測定した。細胞数は年輪幅を測定 ($\times 4$) した後、1年輪内に含まれる放射方向1列あたりの細胞数を接線方向に10列測定し、その平均値を求めた。また、木部母細胞の平均的な放射方向拡大量を明らかにするため、仮道管細胞の放射径を測定した。放射径は年輪幅を細胞数で除した平均値を求めた。さらに、木部母細胞の平均的な接線方向拡大量を明らかにするため、早材仮道管細胞の接線径を測定した。接線径は晩材-早材の年輪境界部から放射方向に数えて2つ目の細胞の最大接線径を接線方向に50個測定 ($\times 100$) し、その平均値を求めた。

3. 結果

結果を樹幹成長とその特性、樹幹内における材質変動、材質変動要因としての細胞寸法変動の順に示す。本研究においては各試料木において共通した傾向を中心に記述し、100年程度のスギ長伐期施業においてみられる共通した成長と材質の関係を把握しようとした。

3. 1 樹幹全体の成長特性

まず、樹高、直径、材積に関する各種成長量及び成長率、樹幹内における年輪幅の分布傾向を明らかにするため、長伐期施業におけるスギ樹幹全体の成長に関する結果を示す。

3. 1. 1 樹幹解析図

樹幹解析によって得られた樹幹解析図を図1に示す。図1より、5年ごとの年輪幅が地上高方向に向かってほとんど変化しないことが明らかとなった。また、髓付近および樹幹下部において年輪幅が各試料木の樹幹内部で相対的に大きな値をとる傾向が見られた。

3. 1. 2 連年および平均材積成長量曲線

連年および平均材積成長量曲線のグラフを図2に示す。材積については全ての試料木で樹齢95年まで連年成長量が平均成長量を上回っていた。木頭Aは樹齢100年で、木頭Cは樹齢110年で連年成長量が平均成長量を下回り、その後も減少傾向を示した。

3. 1. 3 樹高、元玉末口直径、材積における成長率の変動

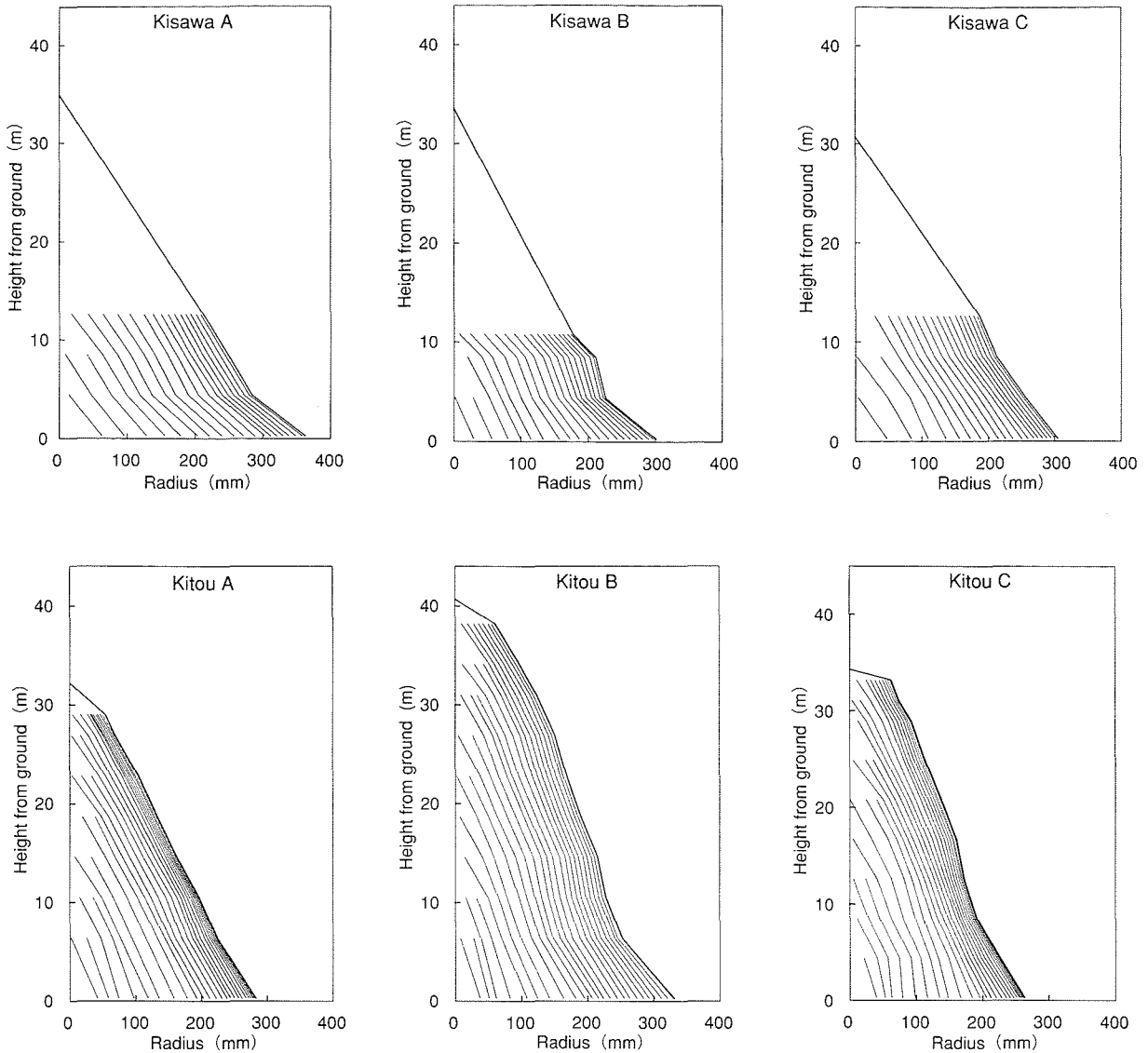


図1 樹幹解析図(木沢A~C, 木頭A~C)
Fig 1 Profiles of stem analysis (Kisawa A-C, Kitou A-C).

図3に樹高、元玉末口直径、材積の各齢級における成長率を示す。成長率は樹齢が小さいときほど大きな値を示し、樹齢10~30年前後まで急激な減少をした後、漸減する傾向を示した。各指標における成長率が10%、5%、1%以下となる平均的な齢級を調べると表2のようになった。表2より成長率が10%、5%、1%以下となる齢級は、樹高や元玉末口直径および元玉元口直径よりも材積の齢級が大きくなる傾向が明らかとなった。樹齢100年程度までであれば、調査地や試料木によらず同様の傾向が確認された。また、材積の成長率は調査地や試料木によらず樹齢100年程度までは1%以上の値で変動していた。

3. 2 晩材率、平均密度の水平系列変動傾向

次に、長伐期施業における樹幹内部において密度の変動傾向を明らかにするため、各試料木の地際部、樹幹中部、樹幹上部として地上高0.3m、地上高10.8~14.6m、地上高29.0~31.0m(木頭のみ)の地上高における晩材率と平均密度の水平系列変動を示す。

3. 2. 1 平均密度の水平系列変動

図4に平均密度の水平系列変動を示す。図4より、平均密度は髓から10年前後まで急激に減少し、その後ほぼ一定、もしくは漸減してゆくという傾向がみられた。同一樹齢において平均密度は地上高の高い部位で大きくなる傾向がみられた。平均密度はおおよそ350~650kg/m³の範囲内で変動し、同一試料木でも円盤が採

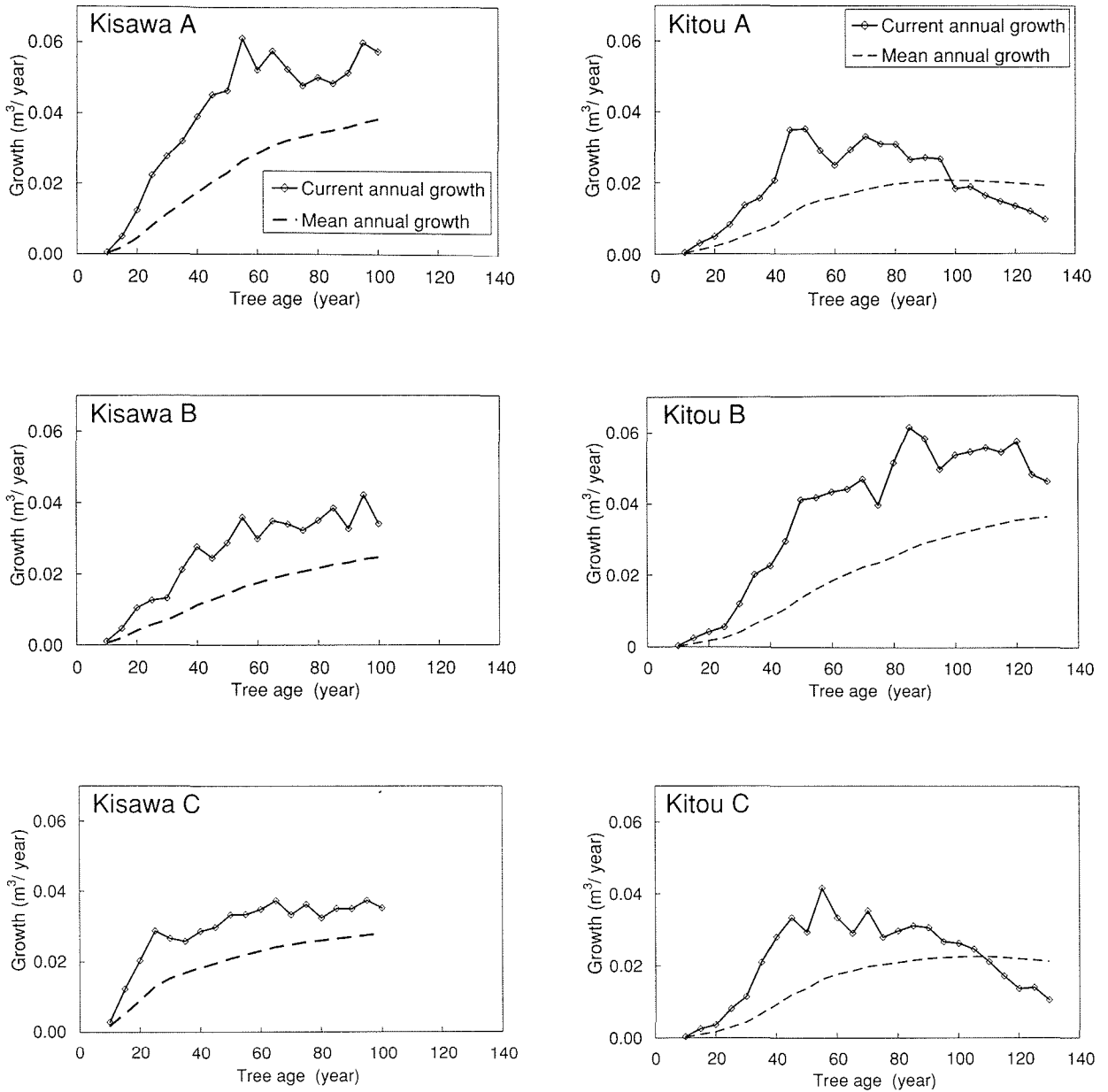


図2 連年および平均材積成長量曲線 (木沢A~C, 木頭A~C)
 Fig 2 Current and mean growth curves of stem volume (Kisawa A-C, Kitou A-C)

取された地上高によって変動傾向に違いが見られるものもあった。

3. 2. 2 晩材率の水平系列変動

図5に晩材率の水平系列変動を示す。図5より、晩材率は髓付近で非常に大きな値をとった後に地際部では20%前後、それ以外の部位では30~40%前後の値をとりながら安定した変動傾向を示した。また、同一樹齢においては地際部よりも樹幹中部で晩材率の値が大きくなるという傾向が木頭の試料木で共通してみられた。

3. 3 年輪構造の水平系列変動傾向

最後に、長伐期施業における密度の変動要因となる形成層帯の分裂と拡大に関する活動を明らかにするため、地上高0.3mと地上高4.4m (木頭のAとBについては6.4m)における平均放射径と接線径の水平系列変動を示す。

3. 3. 1 平均放射径の水平系列変動

図6に平均放射径の水平系列変動を示す。図6より、平均放射径は樹齢100年程度まで試料木、部位によらず漸増、あるいは一定の変動をする傾向にあることが明らか

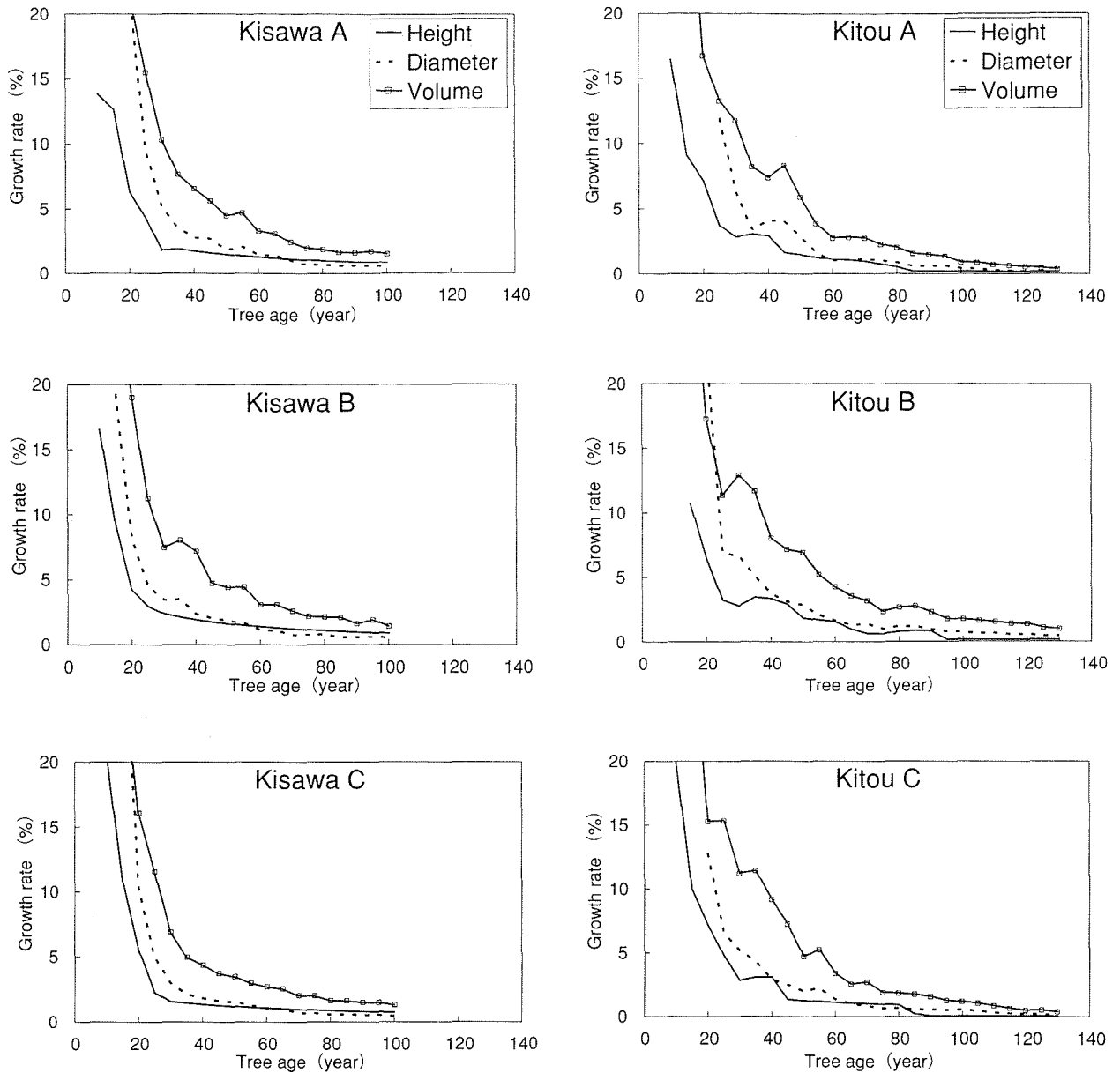


図3 樹高、直径および材積成長率曲線（木沢A～C、木頭A～C）

Fig 3 Growth rate curves of height, diameter and volume (Kisawa A-C, Kitou A-C)

表2 成長率が減少する樹齢

Table 2 Tree ages of corresponding growth rate.

	Height	Disc1 diameter	Disc2 diameter	Volume
10% (year)	20	25	25	35
5% (year)	25	30	35	55
1% (year)	70	70	70	over100

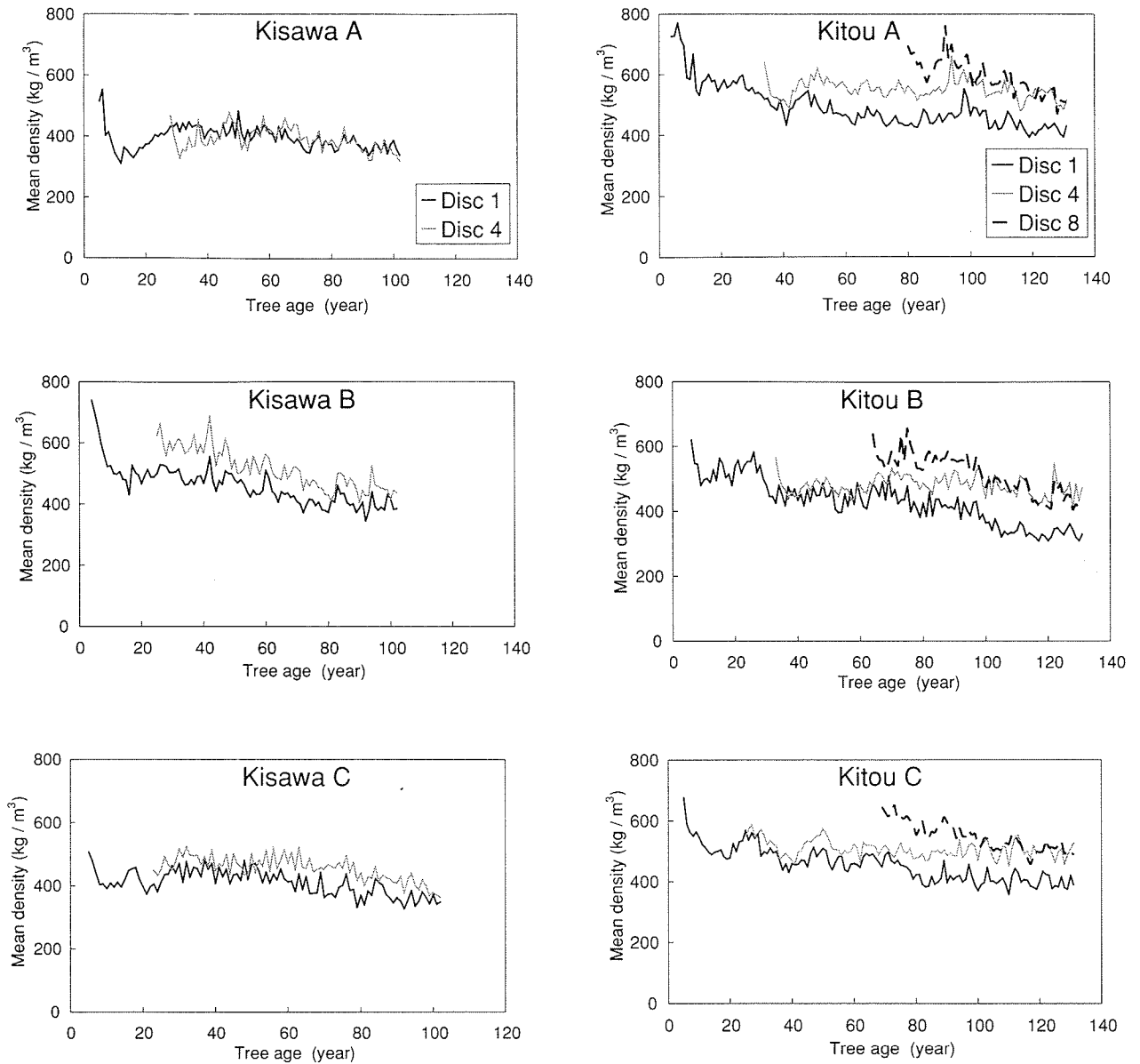


図4 平均密度の水平系列変動 (木沢A~C, 木頭A~C)
 Fig 4 Radial variation of mean density (Kisawa A-C, Kitou A-C).

かとなった。また、全ての試料木において樹齢60年以降で地上高0.3mにおける放射径が地上高4.4mあるいは6.4mの放射径よりも大きな値を示した。

3. 3. 2 接線径の水平系列変動

図7に接線径の水平系列変動を示す。図7より、各試料木とも髓から漸増してゆく傾向がみられた。また、樹齢が同じ場合は、地上高0.3mの部位の方が地上高4.4mあるいは6.4mの部位よりも若干大きいという傾向が得られたが、ほとんど差はないものと思われた。

4. 考察

長伐期施業を経て育成されたスギの成長と材質の関係を明らかにするため、樹幹材積の成長特性、樹幹内における密度の変動傾向、形成層帯における木部形成活動の経年変化に着目して考察を行った。

4. 1 長伐期施業におけるスギ樹幹材積成長特性

長伐期施業におけるスギ樹幹材積成長特性について考察を行った。図1より、100年間の長伐期施業の特徴と

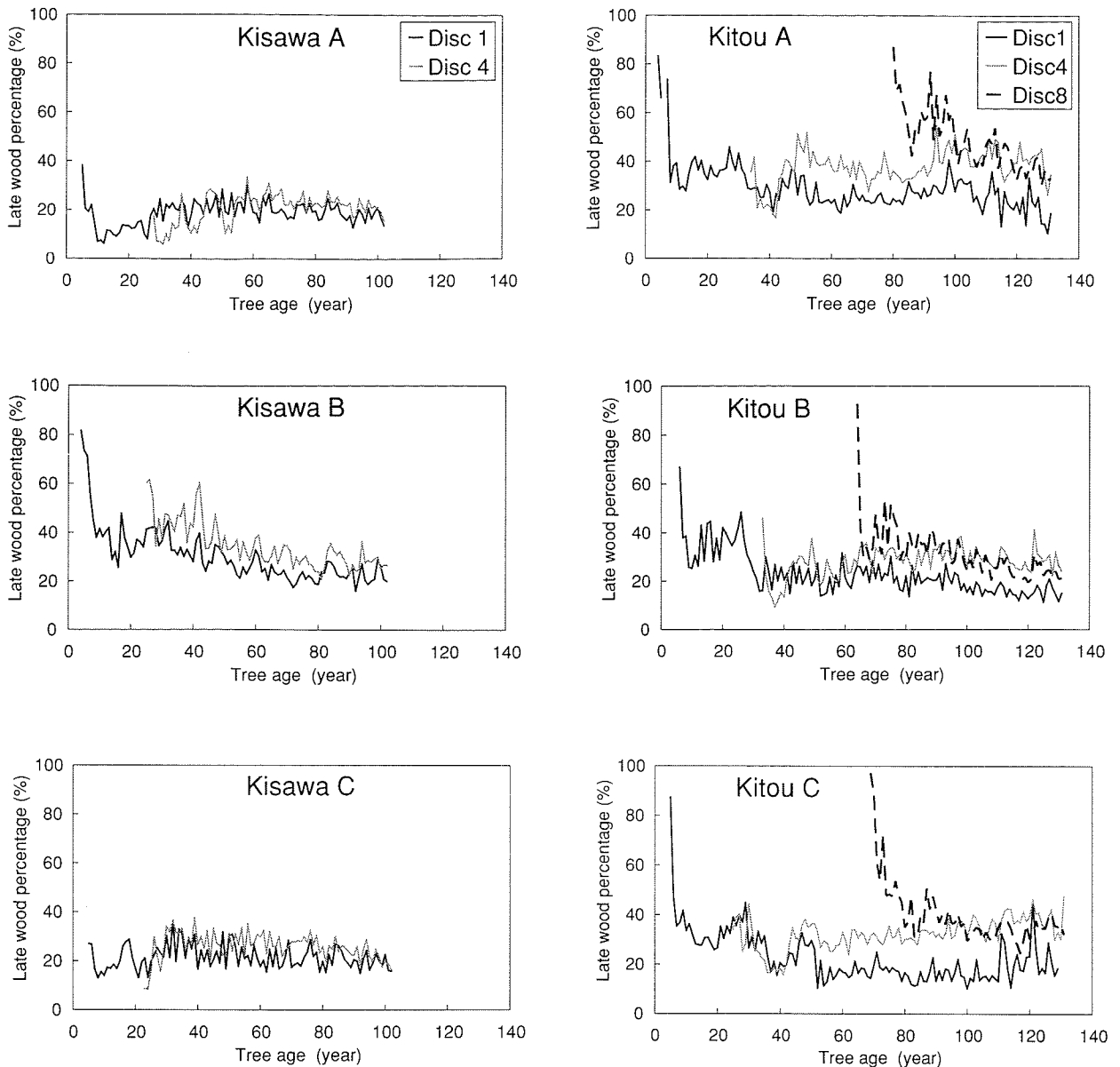


図5 晩材率の水平系列変動(木沢A~C, 木頭A~C)
 Fig 5 Radial variation of late wood percentage (Kisawa A-C, Kitou A-C).

して、樹高の総成長量が頭打ちになりつつあることが示唆された。図3や表2からも樹齢100年までに全ての試料木で樹高成長率が1%以下となっており、樹高の総成長量が頭打ちになっていることを裏付けていると考えられた。スギにおける従来の伐期と考えられる40~60年において樹高成長率を見ると、図3よりいずれも樹高成長率が1%を上回っていた。したがって、樹高成長率が1%以下となる樹齢における樹幹成長特性が長伐期施業の特色と言えるのではないかと考えられた。

次に、単木あたりの平均材積成長量が最大となる時点

を最適間伐木であると仮定し、長伐期施業の期間を検討した。図2より樹齢95年までは全ての試料木において連年材積成長量が平均材積成長量を上回っていた。よって、単木あたりでの平均材積成長量が最大となる樹齢を伐期と考えると、樹齢95年までは材の生産目的に合わせて伐期を設定することが可能であることが示唆された。理論上の平均材積成長量が最大となる時点は連年材積成長量と平均材積成長量が交差する時点が目安となる。木頭のBと木沢の試料木については連年材積成長量が平均材積成長量を上回っていることから、単木単位での平均材積

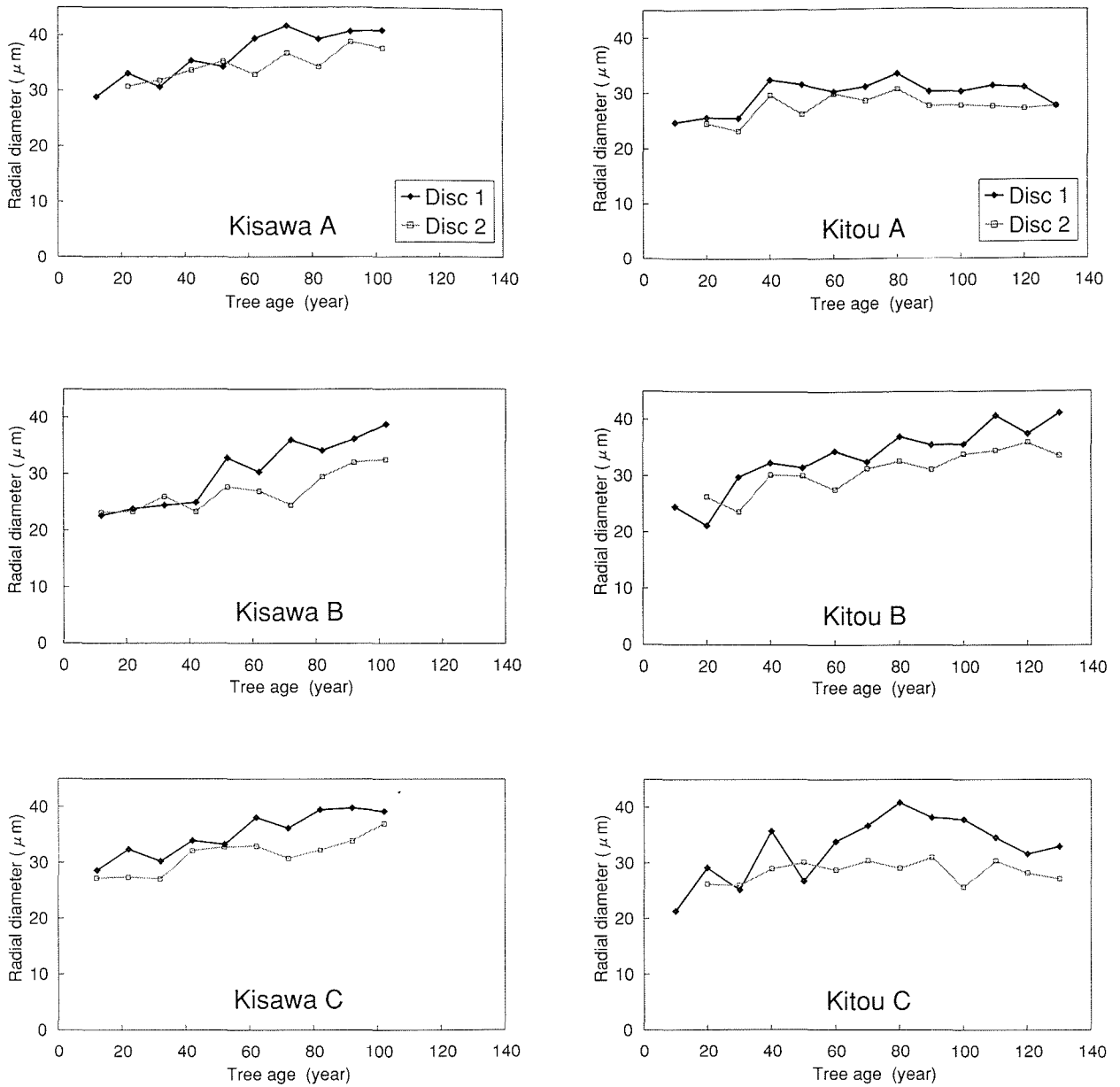


図6 仮道管放射径の水平系列変動 (木沢A~C, 木頭A~C)
 Fig 6 Radial variation of tracheid radial diameter (Kisawa A-C, Kitou A-C).

成長量が最大となる樹齢を伐期と考えると、まだ伐期を伸ばすことが可能であることが示唆された。

さらに、長伐期施業において生産される材積を構成する年輪幅が樹幹内でどのような分布をしているかを調べた。図1と表2より、樹高成長率が1%以下となる樹齢70年以降においては地上高によらず年輪幅がほとんど変化せず、また、材の形質はうらごけになる傾向にあることが示唆された。スギについては髓付近で大きな年輪幅となるといわれている(平川, 2002)が、長伐期施業においてはそのような傾向が薄れてゆき、樹高成長量と何

らかの関係があるものと考えられた。

樹高成長率の経年変動傾向についての先行研究事例としては263年生の行者スギ(井上・関屋, 1957)、山塚国有林117年生および花園国有林188年生スギ(関屋, 1958)における樹幹解析結果の報告がある。これらの報告では樹高成長率が樹齢30年で5%以下となり、樹齢80年以降は樹高成長率が1%以下となっている。樹齢による樹高成長率と材積成長率の変動に関して本研究とはほぼ同様の傾向であったと考えられた。また、材積成長率は樹齢40~60年前後で5%以下となっている。樹齢100年前後ま

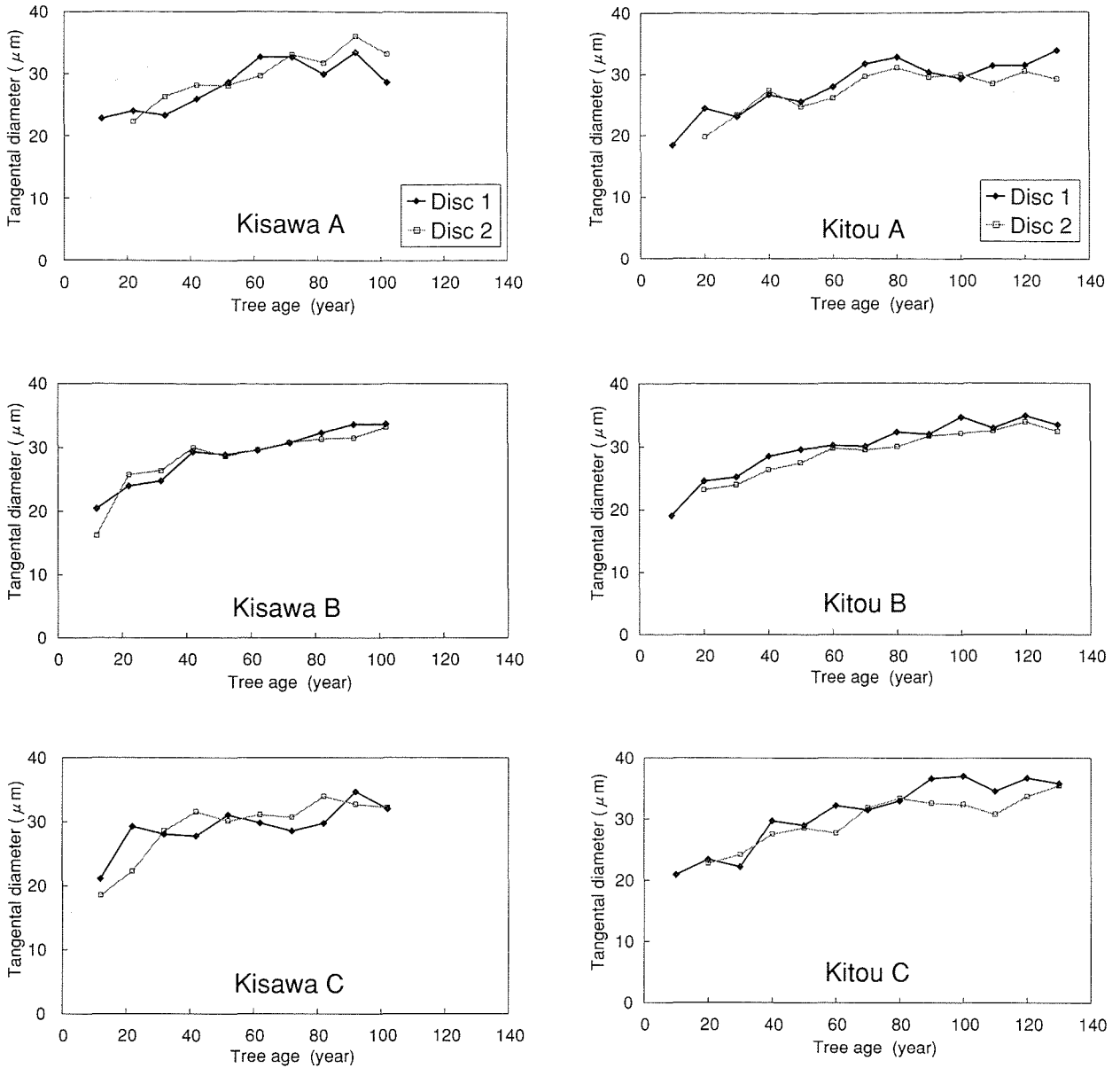


図7 仮道管接線径の水平系列変動 (木沢A~C, 木頭A~C)
Fig 7 Radial variation of tracheid tangential diameter (Kisawa A-C, Kitou A-C).

では1%以上の成長率が報告されており、この点についても同様の傾向であったと考えられた。

4. 2 長伐期施業における樹幹内密度の変動

これまでの議論によって長伐期施業における樹幹材積の成長特性を把握できたと考えられる。以降は成長特性を構成する密度がどのような変動傾向であるかを考察してゆくことにする。

樹幹内における材質指標の変動傾向を調べる方法には同一地上高における変動を調べる水平系列、同一樹齢に

おける変動を調べる斜め系列、髓から数えた年輪番号が同一の変動を調べる垂直系列の3つの系列があることが知られている (Duff and Nolan, 1953; 田島, 1967; Hervert, 1968)。樹幹内の材質変動は水平系列もしくは斜め系列における変動を調べることによって形成層齢の影響を知ることができる。スギの樹幹内における材質変動については、髓付近における変動の大きい未成熟材部とその外側に位置する変動の小さい成熟材部に区分して考えられることが多く、髓からの年輪番号や距離によって未成熟材部の範囲が定められる (平川, 2002)。こ

の未成熟材部の区分方法は晩材仮道管長の成長率による区分方法(塩倉, 1982)などが考案されており, これまでの研究報告から髓から10~25年, もしくは髓から5~8cmまでの範囲が未成熟材部であると考えられている。

以上のような変動系列と未成熟材部についての知見を元に, 水平系列の変動について平均密度と晩材率が加齢によってこれまでの報告と同様な変動をするのか考察した。図1より年輪幅の斜め系列(同一樹齢)における変動は小さいと考えられたため, 各樹齢における地際部, 樹幹中部, 樹幹上部において平均密度と晩材率の水平系列変動傾向を調べると同時にある程度の樹高方向の違いについても考察することにした。

長伐期施業によって樹高成長率が1%以下となる樹齢70年以降について, 平均密度と晩材率の水平系列変動傾向を考察した。図4より, 平均密度は加齢とともに漸減もしくはほぼ一定の範囲内で安定した変動傾向を示し, 急激な変化は見られなかった。地上高別には同一樹齢で比較した場合に地上高が高いほど平均密度が大きくなる傾向がみられたが, 加齢による水平系列の変動傾向はほぼ同様であった。同様に, 晩材率についても水平系列変動傾向を考察した。図5より, 晩材率は加齢とともに増減を繰り返し, 一部では漸減傾向が見られたものの, 水平系列においてはほぼ一定の値を取る傾向にあると考えられた。地上高別には同一樹齢で比較した場合に地上高が高いほど晩材率が大きくなる傾向が見られたが, 加齢による水平系列の変動傾向はほぼ同様であった。

図1より, 年輪幅と平均密度, 晩材率の変動傾向を合わせてみると, 年輪幅と平均密度は水平系列においておおよそ漸減傾向があると考えられるが, 晩材率については水平系列における漸減傾向はほとんど見られなかった。一般に, 針葉樹における平均密度と晩材率は比例関係にあると考えられるが, 晩材率だけでは平均密度の変動を表すことが困難であると考えられた。

4. 3 形成層帯における木部形成の経年変化

以上の議論から, 長伐期施業における樹幹材積の成長特性と成長の中身である密度の変動傾向をおおよそ把握できた。その中で, 平均密度の変動を年輪幅や晩材率といった軟X線デンストメトリーによる情報だけでは説明できない変動傾向も明らかとなった。そこで, 形成層帯における木部形成活動の経年変化について着目し, 細胞寸法を測定することによって平均密度の変動傾向を明らかにしようとした。すなわち, 平均密度の変動は晩材率が同様でも年輪構造が異なるためであると仮定し, 年輪構造を調べて密度が減少する要因を明らかにしようとした。

図6より, 木沢の3試料木と木頭Bは加齢とともに放射

径が漸増する傾向にあった。木頭AとCでは樹齢80年程度まで漸増傾向にあると言えるものの, それ以降は横ばいあるいは漸減の傾向を示した。また, 図7より, 接線径は全ての試料木で樹齢とともに漸増するという傾向が見られた。よって, 加齢とともに仮道管細胞の平均的な径は増加し, 木口面における単位面積あたりに含まれる仮道管細胞の数が減少することによって密度が減少している可能性が示唆された。なお, 樹齢70年以降においても接線径についてはそれまでと同様に漸増傾向にあることから, 木部母細胞の接線径自身が増大している可能性もまた示唆された。針葉樹における年輪幅と細胞数の関係については髓付近以外での相関が強い傾向が知られている(加納, 1958; 堀場, 1973)。各試料木の元玉両木口面における細胞数と年輪幅の相関について散布図によって回帰直線を調べると R^2 値が0.9以上($p < 0.01$)となり, これまでの報告と同様に強い正の相関関係があることが明らかとなった。よって, 本研究においても年輪幅を構成する細胞の数は晩材率の大小によって変動するものの, 各試料木の回帰直線によって精度良く推定できると考えられた。また, 図1より樹齢の増加に伴い年輪幅が減少していることから, 放射方向への細胞分裂回数は減少傾向にあると考えられた。

スギのような晩材率の小さい樹種については平均密度が早材密度の影響を受けやすいとされている(田島, 1967)。そこで, 平均密度が減少する要因を接線径の増加による早材密度の減少によってできると仮説を立て, 接線径と早材密度の相関を木沢の試料木について調べた。早材密度と接線径には各試料木について危険率5%で有意な負の相関関係が得られた。相関係数の大きさには各試料木で違いが見られたものの, R^2 値が0.24~0.55($p < 0.05$)となり, 密度と相関があると考えられた。木材の密度には木口面の細胞壁厚と有意な相関があると考えられる。本研究では細胞壁厚に関するデータを測定していないため, 接線径の増加のみで密度の減少を説明するのは難がある。しかしながら, 早材密度と接線径の回帰直線が有意な負の相関になることから, 水平系列における早材密度の減少は木部母細胞自身が接線方向に寸法を増大していることが密度減少要因のひとつであることが示唆された。これは仮道管を生産する木部母細胞自体の接線方向寸法が加齢により漸増してゆくことによると考えられた。

5. おわりに

100年以上徳島県木頭林業地域で育成された6本のスギ試料から地上高別に得られた円盤試料について軟X線デ

ンシトメトリーを行い、年輪幅を測定したのち樹幹解析を行った。また、測定された平均密度と晩材率の水平系列変動について変動傾向を明らかにし、光学顕微鏡による年輪構造の観察から密度の変動要因となる細胞寸法についても考察を行った。スギ長伐期施業における樹幹材積の成長特性、材積成長にともなう平均密度の変動傾向、形成層帯の本部形成活動について以下のようにまとめた。

スギにおける従来の伐期である樹齢40年～60年までにおいては樹高成長率が1%以上であったが、樹齢70年以降で樹高成長率が1%以下となった。したがって、長伐期施業の特徴は樹高成長率が1%以下となる樹齢で見られると考えられる。その特徴の一つとして、樹高成長率が1%以下となる樹齢70年以降においては地上高によらず年輪幅がほとんど変化しないことが挙げられる。

平均密度は髓付近で大きな値を取った後、樹皮方向へ向かって漸減する傾向が見られた。樹高成長率が1%以下となる樹齢70年以降においても平均密度に急激な変動傾向は見られなかった。晩材率は髓付近で大きな値を取った後、20～40%前後の範囲内で変動し、増減の傾向は特に見られなかった。樹高成長率が1%以下となる樹齢70年以降においても晩材率に急激な変動傾向は見られなかった。よって100年程度の加齢で材質に急激な変動が起こる可能性は小さいと考えられる。

形成層帯における本部形成活動によって生産される仮道管細胞径は平均放射径、接線径共に長伐期施業期間中は漸増する傾向にあった。特に接線径は樹幹材積成長量などによらず漸増傾向にあったことから、本部母細胞自身の接線径が加齢によって増加し、生産される仮道管の接線径が増加することは平均密度の減少を引き起こす一つの要因であると考えられる。

今後はスギ長伐期施業方法を確立するためにも林分データと試料木データの関係などを明らかにしていく必要がある。また、長伐期施業によって生産された木材の利用に向けて未成熟材の区分や強度と材質の関連を明らかにするため、仮道管長やフィブリル傾角を測定すること、細胞壁厚等の肥厚の状態を測定すること、リグニンなどの化学成分の変化について考察してゆくことが重要であると考えられる。

謝辞

本論文の作成にあたり京都大学大学院農学研究所森林利用学分野の岡田直紀助教授、長谷川尚史助手には有益な助言をいただきました。また、軟X線デンシトメトリーの実験については独立行政法人森林総合研究所組織材質研究室の平川泰彦氏、藤原健氏、山下香菜氏の各氏に

お世話になりました。本研究の試料採取にあたっては、徳島県森林林業研究所の網田克明氏、TSウッドハウス協同組合の亀井広吉氏、和田善行氏、三浦茂則氏をはじめとするみなさまにお世話になりました。ここに謹んで感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Duff G. H. and Nolan, N. J. (1953) Growth and Morphogenesis in the Canadian Forest Species I. The Controls of Cambial and Apical Activity in *Pinus Resinosa* AIT. Can.J.Bot.31: 471-513
- 2) 深沢和三 (1967) スギ樹幹内の材質変動に関する研究. 岐阜大学農報. 25 : 47-124
- 3) Tepper, H. B., Wilcox, H. E., and Valentine, F.A. (1968) The Effect of Fertilization and Depth To Ground Water on Wood Deposition in Red Pine For. Sci. 14 : 2-6
- 4) 平川泰彦 (2002) スギ材質の特徴. 林業技術. 718 : 3-9
- 5) 堀場義平 (1973) 神宮スギの年輪幅について (第3報) ~ 細胞径配列分布の分析. 三重大農紀要. 45 : 109-125
- 6) 井上由扶・関屋雄偉 (1957) 大材生産林分の研究 第1報 行者杉について. 九州大学農学部演習林集報. 7 : 33-65
- 7) 加納孟 (1958) 木材材質の森林生物学的研究 (第9報) ~ 北海道厚田産トドマツ材の年輪構造について. 林業試験場報告. 71 : 15-25
- 8) 太田貞明 (1970) 軟X線デンシトメーターによる木材密度の測定. 木材工業. 25 : 131-133
- 9) 桜井尚武 (2002) わかりやすい林業研究会説シリーズ 長伐期林の実態—その効果と取り扱い技術—. 173pp, 林業科学技術振興所, 東京.
- 10) 関屋雄偉 (1958) 大材生産林分の研究 第2報 小石原におけるスギ大材林分について. 九州大学農学部演習林集報. 9 : 35-55
- 11) 塩倉高義 (1982) 針葉樹材における未成熟材の区分とその範囲. 木材学会誌. 28. 2. 85-90
- 12) 鈴木誠・白石則彦・鈴木祐紀・龍原哲・山本博一 (1995) 千葉演習林におけるスギ高齢林分の間伐方法に関する検討. 林学会誌. 77 : 314-320
- 13) 鈴木誠・龍原哲・石原猛・南雲秀次郎 (2003) スギ高齢林の育成に関する研究 (I) 清澄地域におけるスギ高齢人工林の成立過程. 東大演報. 109 : 27-45
- 14) 鈴木正 (1995) 林業改良普及双書. 121 大径材生産の林業. 175pp, 全国林業改良普及協会, 東京.
- 15) 田島俊雄 (1967) 林木の生長と材質. 東京教大農紀要. 13 : 65-210
- 16) 高橋絵里奈・竹内典之 (2001) 奈良県川上村上多古及び高原における高齢スギ人工林の現状と今後の施業方針. 森林研究. 73 : 59-66
- 17) 竹内郁夫・伊東宏樹 (2002) スギ高齢人工林の成長実態. 平成14年度森林総研四国支所年報 : 21
- 18) 山田茂雄・村松保男 (1971) 例解測樹の実務 (再訂増補). 章4 樹幹解析法, 17-38, 地球出版

(2005年6月17日受理)